

Paál György: „Instacionárius áramlások: régi problémák új megközelítésben” című MTA doktori értekezésének bírálata

Az MTA doktora tudományos fokozat odaítélésének feltétele, hogy a jelölt olyan eredeti, új tudományos eredményeket mutasson fel értekezésében, amely az adott tudományterület eddigi szintjéhez képest jelentős továbbfejlődést eredményezett.

A jelölt értekezésének témája megfelel azoknak a kritériumoknak, amelyek a fokozat odaítélése szempontjából mind elméleti, mind gyakorlati téren megkívántatnak. A megoldandó feladat: időben változó öngerjesztett és kívülről gerjesztett áramlások vizsgálata elméleti és kísérleti módszerekkel. A legutóbbi évtizedekig a megfelelő eszközök hiányában az áramlástani kutatások középpontjában az időben állandó áramlások álltak. Az időben változó, háromdimenziós feladatok vizsgálatát elsősorban a kísérleti lehetőségek korlátozott volta késleltette. A PIV eszközök több időpillanatban egy teljes síkon egyidejűleg képesek a sebességi mező kvantitatív meghatározására, a gyors digitális kamerák az áramlás vizualizációjában váltak nélkülözhetetlenné, a piezometrikus nyomásérzékelők és a digitális adattárolás, a vizualizációs szoftverek valamint az egyre fejlődő numerikus szimulációs eljárások kedvező kölcsönhatásba kerültek kitágítva a kutatás lehetőségeit. A szerző ezt az ígéretes konstellációt kitűnő helyzetfelismeréssel használta ki és ért el nemzetközi összehasonlításban is figyelemreméltó eredményeket.

Az úgynevezett öngerjesztő pulzáló áramlások esetében a vizsgált rendszer határán minden peremfeltétel stacionárius, de az áramlás geometriája időben változó folyamatokat indukál. Ez a legtöbbször káros rezgésekben jelentkezik, de szükséges is lehet például fúvós hangszerek hangképzésekor. Az értekezés első része ez utóbbi jelenségkör vizsgálatára fókuszál, s jut értékes új tudományos eredményekhez.

A mérnöki gyakorlatban a kívülről gerjesztett pulzáló áramlás klasszikus esete a dugattyús szivattyúval megvalósított folyadékszállítás. Az olajbányászatban használt, a kőolajat a kutakból felszínre hozó mélyszivattyúk széles körben közismertek. A műszaki és az élettudományok határterületére esik az érrendszerben kialakuló véráramlás, amelyet a szív, mint térfogatkiszorítású szivattyú munkája tart fenn. A bonyolult geometriájú érhalózat és a könnyen deformálódó érfalak miatt a véráramlás hemodinamikai leírása rendkívül nehéz feladat. Az érfalak meggyengülése gyakran vezet azok kóros kitágulására, helyi kiöblösödésére, ezek az úgynevezett aneurizmák. Az értekezés második részében a szerző az aneurizmákban kialakuló áramlások kísérleti és szimulációs vizsgálatával foglalkozik.

Véleményem szerint az értekezés mindkét része külön-külön is megállná a helyét, mint önálló disszertáció. Mind a feldolgozott tárgy terjedelme, mind az elért új tudományos eredmények minősége és mennyisége megerősíti ezt. Az egy értekezésként való megjelenés mellett szól az alkalmazott kutatási módszerek azonossága és talán az a szubjektív elem, hogy a szerző számára

mindkét munka egyformán kedves és valamennyi elért eredményével együtt kívánja megméretni magát.

Az elvégzett hatalmas munka bemutatása a túlzott terjedelem elkerülése miatt nyilvánvalóan csak fegyelmezetten tömör formában lehetséges. Ez a tömörítés viszont megnehezíti a bíráló, vagy a mélyebben érdeklődő olvasó dolgát, amikor a szerző gondolatmenetének bizonyos elemeit korábban megjelent publikációiban javasolja megkeresni.

Mindazonáltal a szerző a két különböző interdiszciplináris területet sikeresen integrálja értekezésében. A jelenség-orientált szemléletmód és nyelvezet dominál az alkalmazás-orientált munkákban gyakran előforduló partikuláris tárgyalásmód és szakmai szleng felett. Az egységes tárgyalásmód az értekezés nagy erénye, ezért a szerzőt feltétlen elismerés illeti meg.

Az értekezés első része bevezetést követően három fejezetből áll. Az 1.2 az élhangok, az 1.3 az üreghangok tulajdonságait vizsgálja szimulációs és kísérleti módszerekkel. Az 1.4 fejezet pedig a sík szabadsugarak érzékenységét elemzi.

Az 1.2 fejezetben az élhangok jelenségkörének leírását találjuk. Ilyen öngerjesztett pulzálás bárhol létrejöhet, ahol egy szabadsugár vagy egy határréteg szilárd felületnek ütközik. Fizikai kísérletekkel alátámasztott numerikus szimulációval sikerült az irodalomból ismert jelenséget reprodukálni, pontosítani és eddig ismeretlen jelenségeket, tényeket felfedezni. Az ék visszahatását a fúvókára az irodalomban általánosan elfogadott módszer egy dipólus-hangforrással modellezni. Összenyomhatatlan közegben ez a visszahatás nem működhetne. A szerző a visszahatás mechanizmusára a Biot-Savart tételnek megfelelően az örvényesség hatásában találja meg a magyarázatot.

A korábban ismert élhang-frekvencia képletek helyett a hasonlóságelmélet módszereivel dimenzió nélküli frekvencia-egyenletet ad meg a Strouhal-szám, a Reynolds-szám valamint a dimenziótlan fúvóka-ék távolság között. Ez speciális esetként magába foglalja a korábbi frekvencia-képleteket. Az adódó Strouhal-szám és a Reynolds-szám közötti összefüggést kísérletileg is igazolta.

A szerző magyarázatot ad a parabolikus sebességprofilú élhang és az egyenletes profillal adódó élhang frekvencia-különbségére a két különböző áramlás viselkedését összehasonlítva számos új, lényeges felismerésre jut. A módushatárok és a magasabb módusok jelentkezésében is egybeveti a két sebességprofil esetén adódó különbségeket. A módushatárok környékén mind kísérletileg, mind szimulációval sikerült módusugrást és úgynevezett móduskapcsolgatást, azaz spontán, külső gerjesztés nélkül megtörténő ideiglenes oda-vissza módusváltozást előállítani.

A szerző a zavarás terjedési sebességét keresztkorrekciós módszerrel határozza meg. Az első módus fázisa a fúvókától mért távolság függvényében a Reynolds-számtól független, univerzális négyzetes összefüggéssel írható le. Megállapítást nyer, hogy a fúvókától távolodva a zavarási sebesség hiperbolikusan csökken. Új megállapítás, hogy a „fázissebesség” kifejezés csak tisztán harmonikus zavarás esetén használható, vagy csak akkor, ha a rendszer nem diszperzív. Ha több frekvencia együtt van jelen, mindegyik módus más sebességgel terjed.

A szerző kimutatta, hogy az ék felületén kialakuló nyomáseloszlás és az ékre ható erő időátlagolt támadáspontja független mind a Reynolds-számtól, mind a fúvóka-ék távolságtól.

Az élhangok vizsgálatából kapott, eddig ismeretlen jelenségeket, azok összefüggéseit foglalja össze az első tézis. A tézis tartalmas, de nem terjengős, lényegre törő. Elfogadom.

Az 1.3. fejezet az üreghangokkal végzett vizsgálatokat tartalmazza. Ez az öngejesztett áramlás-típus egy sík felületbe vágott téglatest alakú mélyedés fölött jön létre és az instabilitási hullám az üreg hátsó élével kölcsönhatva képez hangforrást, ami zajjal, rezgésekkel jár, esetleg törést is okoz. Ennek csökkentése nagy gyakorlati fontosságú feladat, ami a jelenség mechanizmusának valóságghú ismeretét igényli.

A szerző spektrálanalízis segítségével három jellegzetes tartományt azonosít a Reynolds-szám függvényében, az ún. szabályos, az átmeneti és az elnyomott tartományt. A szimulációban $L/D=2$ üregkonfigurációt használ. A határrétegben terjedő instabilitási hullám terjedési sebességének mérésére új módszert dolgozott ki. Ennek eredményeként megállapítja, hogy a hullám terjedési sebessége függ a belépő határréteg vastagságától és az üreg mentén erősen változik. A határréteg vastagságát rögzítve viszont széles Reynolds-szám tartományban állandó.

A határrétegben terjedő instabilitási hullám amplitudójának mérésére is új módszert dolgozott ki a szerző. Az amplitudó üreg menti változásának jellege minden Reynolds-számnál hasonló, csak számértéke változik. Az új kétdimenziós örvénydetektálási módszerrel az üreghang-áramlásban sokkal finomabb struktúrák észlelhetők, mint az irodalomban ismert eljárásokkal.

A jármű-ajtórésben keletkező üreghang szimulációjáról megállapítja, hogy a mély üregek szimulációjára az összenyomhatatlan modell nem alkalmas. Egymással versengő, különböző fizikai mechanizmusokból eredő lengések egyidejű reprodukálása nem lehetséges a ma meglévő kereskedelmi szoftverekkel, de különböző numerikus beállításokkal a különböző eredetű frekvencia csúcsok nagy pontossággal állíthatók elő. Csatornarezonancia szimulációval az egyik ismeretlen frekvencia csúcsot nagy pontossággal sikerült meghatározni.

Az 1.3. fejezetben ismertetett vizsgálatokból származó új tudományos eredményeket a 2., a 3., a 4., az 5., és a 6. tézisekben foglalja össze a fejezet végén. Valamennyi tézist elfogadom.

Az 1.4. fejezet tárgya a sík szabadsugarak stabilitásvizsgálata. Sík szabadsugarakra adaptált stabilitáselemzési módszer eredményeként bebizonyosodott, hogy analitikus sebességprofilok esetében minél közelebb van a sebességprofil az egyenleteshez és minél távolabb az ún. egyensúlyi Bickley profiltól, annál instabilabb. Ezzel a szerző magyarázatot ad az irodalomban ismert, de meg nem magyarázott jelenségre, a sugár fokozott érzékenységre a kilépő keresztmetszet közelében.

Az értekezés második fő része az „Aneurizmák hemodinamikája”. Az érfalak kóros kitágulása elsősorban az agy és a hasi aortákban vezet aneurizmák megjelenésére.

A 2.1 fejezetben a szerző az agyi és a hasi aneurizmák kialakulását, növekedését, kihasadását és kezelését foglalja össze. Az interdiszciplináris területen mérnökök számára nélkülözhetetlen élettani-érsebészeti ismereteket tömören, érthetően tárgyalja.

Az áramlás szimulációjának validálására készült kísérleti berendezést és az ezen elvégzett mérések módszerét ismerteti. Ez ún. „in vitro” páciens-specifikus megközelítés. Az aneurizmát egy szilikontömbben kialakított üreggel modellezi. A valóságos méretek 3,57-szeres nagyításával

kiképzett üregben víz és glicerín keveréke a modellfolyadék, amelynek áramlásában lézer-optikai módszerrel méri a sebességeloszlást. A mérési adatok feldolgozása dimenzió nélküli hasonlósági kritériumok: a Reynolds-szám, a Strouhal-szám és a szorzatukként adódó Womersley-szám függvényében történik. Gondos előkészítő méréseket követően került sor az instacionárius áramlás sebességeloszlásának mérésére.

A 2.2 fejezetben a szerző a véges térfogatú szimulációt mutatja be. Összenyomhatatlan newtoni folyadék instacionárius lamináris áramlását feltételezi. A szimulációból kapott eredményeket a mérések eredményeivel hasonlítja össze és elemzi. A véges térfogatú szimulációt saját fejlesztésű rács-Boltzmann módszerrel is végigviszi.

A 2.3 fejezetben vizsgálja a szerző az aneurizmák szimulációjának legérzékenyebb pontját, a peremfeltételek helyes megválasztását, amelyet a szakirodalom érthetetlenül nem kezel fontosságának megfelelően. Az agyi aneurizmák peremfeltételeit vizsgálva megállapítja, hogy a belépő peremfeltételként az időfüggő térfogatáramot, vagy az átlagsebességet kell venni. A kilépő peremfeltétel az állandó nyomásszint, amelynek meghatározásánál szükséges az áramlási ellenállás figyelembevétele. Ezt lehet párhuzamosan kapcsolt csőágak, fraktál-fák, vagy porózus közeg ellenállásaként számítani. A rugalmas érfalra, mint határoló felületre vonatkozó peremfeltétel a falon adódó nyírófeszítéssel jellemezhető.

A hasi aneurizmák szimulációjának peremfeltételeit a belépéskor a tranziens Womersley-sebességeloszlással, kilépéskor porózus közeggel közelítve adja meg. A falon sebesség, nyírófeszítés vagy nyomáseloszlás írható elő.

A szerző megállapítja, hogy a valódi aneurizma-geometriáknál a legnagyobb deformációjú (szisztolés) alakzatán végzett merev falú szimulációk eredményei sokkal közelebb vannak a rugalmas falú (FSI) szimulációk eredményeihez, mint a legkisebb deformációjú (diasztolés) alak eredményei. A rugalmas és a merev falú szimulációk közötti különbségeket dominánsan a geometriai viszonyok és nem a fal-dinamika okozzák.

Az artériás hálózaton végzett egydimenziós szimuláció eredményei a háromdimenziós szimuláció térfogatáram és nyomás-peremfeltételeiként használhatók. Ez az új megközelítési módszer tetszőleges érszakaszra alkalmazható. Ezek az eredmények alapozzák meg a 8. tézisben foglaltakat. A tézist elfogadom.

A 2.4. fejezetben az agyi aneurizmák kezelésének elemzését találjuk. Egyrészt mikroszpirálokkal történő kezeléssel, másrészt áramlásmódosító sztenttel lassítható az áramlás, amely végül az aneurizma elhalására vezet. A szerző mérési módszert dolgozott ki az áramlásmódosító sztent áramlási ellenállásának meghatározására. Az áramlási modellben a sztent porózus anyaggal helyettesíthető. Ez új és jobb módszer, mint a sztent-geometriát részletesen modellező módszer. Két sztent egymásba helyezése a második sztent szövött drótszerkezetének az elsőhöz képesti elhelyezkedése véletlen tényezőt vezet be a két sztent együttes ellenállásának értékébe, átlagosan az egy sztent ellenállásának kétszerese adódik a sorba kapcsolt elemeken. Mindezeket az eredményeket a 9. tézis tartalmazza, amelyet elfogadok.

A 2.5. fejezet az agyi aneurizmák áramlásában megjelenő fraktál mintázatokkal foglalkozik. Az agyi aneurizmák körüli érszakaszban szimulált háromdimenziós instacionárius, mérésekkel validált áramlási térben passzív részecskék pályakövetésének segítségével kaotikus struktúrák találhatók. Ezek az aneurizma-zsák jelenlétének következményei. A szabadenergia-függvény és a szokatlanul hosszú tartózkodási idejű részecskék kezdeti pozíciójának felhasználásával több, káoszra jellemző paraméter adódott. Ezek közül a D1 jelű ún. információs dimenzió a legkevésbé érzékeny a mintavételezés helyére. Mivel ez a paraméter az aneurizma geometriájára és az áramlásra is jellemző, kellő számú aneurizma megvizsgálása után D1 az aneurizmák osztályozására is alkalmas lehet. Az ezeket megfogalmazó 10. tézist is elfogadom.

Az elfogadott tézisek alapján a Jelölt munkáját a tudományterület jelentős, alkotó továbbfejlesztésének tartom.

Az értekezés szépen, jól tagoltan tárgyalja a vizsgálati módszereket, az elért eredményeket. Informatív ábráival, diagramjaival segíti a megértést. A disszertáció stílusa lényegretörő, nem terjengős, bizonyos esetekben túlzottan tömör.

A szerző széles körben publikálta kutatási eredményeit, azokat a szakmai közvélemény nyilvánossága megismerte, elfogadta, nyilvánvalóan hitelesnek tekinthetők. Az értekezés nyilvános vitára bocsátását javaslom.

Paál György vizsgálataim szerint megfelel az MTA Doktori Szabályzat előírásainak, munkájának eredetisége, eddigi tudományos pályafutása méltóvá teszi a cím odaítélésére.

Miskolc, 2016. 03. 21.



Bobok Elemér

az MTA doktora

bíráló

A Jelölt számára a következő kérdéseket javaslom feltenni:

1. A modellezés során a vért áramlástan szempontból newtoni folyadéknak tekintette. A reológiai tulajdonságok pontosabb figyelembe vételére milyen közegmodellt tart alkalmasnak?
2. Fejtse ki bővebben, miért csak nagyon kis átmérőjű véredényekben jelentkeznek nem-newtoni folyadékok áramlására jellemző hatások?
3. Miért korlátozza az érfalon a csúszásmentes peremfeltétel a modellezés pontosságát?